

CZYM JEST „DIGITAL TWIN”?

JAKIE MOŻLIWOŚCI OTWIERA TA TECHNOLOGIA?



MARCIN WOŁEJKO

Dział Urządzeń Ciśnieniowych
Urząd Dozoru Technicznego
Oddział w Gdańsku

Digital Twin (DT) to – zgodnie z pierwszą definicją sformułowaną przez NASA – „zintegrowana wielofizyczna, wieloskalowa, probabilistyczna symulacja pojazdu lub systemu, która wykorzystuje najlepsze dostępne modele fizyczne, aktualizacje z czujników, historię floty itp. aby odzwierciedlić funkcjonowanie jego latającego bliźniaka” [4].

Według definicji podanej przez naukowców z University of Cincinnati jest to „sprzężony model cyfrowy rzeczywistej maszyny, który działa na platformie chmurowej i symuluje stan rzeczywistej maszyny przy użyciu zintegrowanej wiedzy zarówno z algorytmów analitycznych opartych na danych, jak i innej dostępnej wiedzy fizycznej” [18].

Jak napisał Bernard Marr [6], cyfrowe bliźniaki zapewniają dokładnie taką samą możliwość

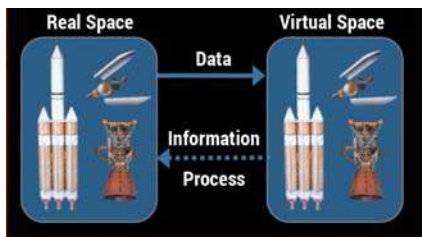
badania i testowania jak obiekty rzeczywiste, ale bez konieczności wykonywania testu w prawdziwym świecie. Możliwości zastosowania są prawie nieograniczone.

David Gelernter przewidział powstanie tej technologii i opisał ją w 1991 roku w książce *Mirror Worlds* [2], a do przemysłu koncepcję tę wprowadził w 2002 roku Michael Grieves – światowy autorytet w dziedzinie zarządzania cyklem życia produktu (PLM – *Product Life-*

cycle Management) [2]. Z początku koncepcja nosiła różne nazwy, dopiero w 2010 roku [2] w raportach rocznych NASA została określona terminem „Digital Twin” [3] [4].

Koncepcja Digital Twin (Rysunek 1) od początku składała się z trzech wymiarów [1]:

- a) fizycznego produktu w przestrzeni rzeczywistej,
- b) cyfrowego/wirtualnego modelu w przestrzeni wirtualnej,
- c) połączeń pomiędzy nimi.

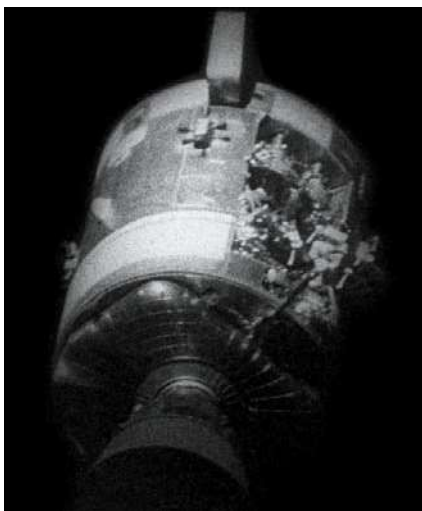


Rysunek 1. Konceptja Digital Twin przedstawiona przez Michała Grievesa w 2014 roku w jego „Digital Twin White Paper” [1]

Przykład Grievesa (Rysunek 1) potwierdza, że największe korzyści z posiadania Digital Twin powstają wtedy, gdy mamy ograniczone możliwości dostępu do obiektu rzeczywistego, jego elementów lub parametrów, np. do badań diagnostycznych. Tak jest zarówno w przypadku obiektów w przestrzeni kosmicznej, jak i w przypadku obiektów, których badanie znacząco wpływa na ich funkcjonowanie.

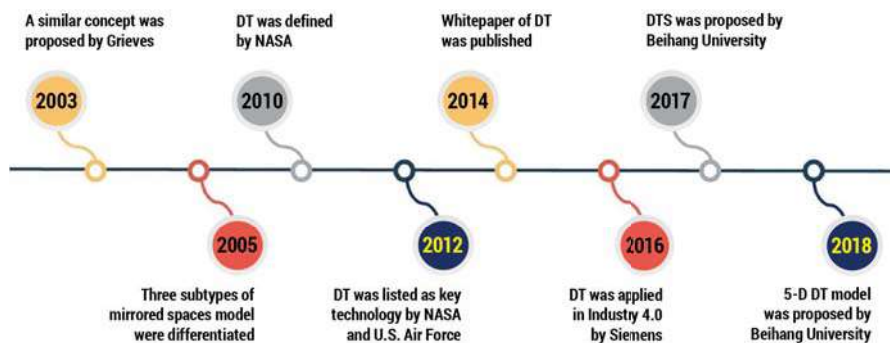
POCZĄTKI...

Za jeden z pierwszych przypadków zastosowania tej technologii, dziś nazywanej „Digital Twin” (cyfrowy bliźniak), uważa się wielokrotną i sprawną adaptację symulatorów szkoleniowych w celu odtworzenia warunków panujących na uszkodzonym Apollo 13 (Rysunek 2). Miało to miejsce w 1970 roku. Wykorzystanie symulatorów i danych z systemów komputerowych umożliwiło pracownikom NASA szybkie poszukiwanie, odrzucanie i doskonalenie scenariuszy działań zmierzających do zapewnienia bezpieczeństwa astronautom [15].



Rysunek 2. Widok uszkodzonego modułu serwisowego Apollo 13 (https://pl.wikipedia.org/wiki/Apollo_13)

Bez pełnej wiedzy oraz bez możliwości przeprowadzenia symulacji scenariuszy działań każda z decyzji załogi czy naziemnego zespołu kontroli misji Apollo 13 mogła być błędna i mogła nieść za sobą tragiczne skutki. Dzięki przeprowadzeniu testów oraz symulacji na fizycznej i wirtualnej kopii statku Apollo 13 powrót astronautów stał się możliwy.



Rysunek 3. Kamienie milowe w rozwoju technologii Digital Twin [5]

W 2018 roku Lockheed Martin umieścił Digital Twin na liście sześciu game-changing technologies dla przemysłu obronnego [5].

W 2019 roku firma Gartner – jedna z opiniotwórczych agencji zajmujących się badaniami i doradztwem biznesowym – sklasyfikowała Digital Twin jako jedną z 10 strategicznych technologii, które mogą usprawnić proces podejmowania decyzji w przedsiębiorstwie. Wspomina się także o cyfrowych bliźniakach organizacji, które modelują procesy organizacyjne i umożliwiają ich monitorowanie organizacji w czasie rzeczywistym i zwiększanie jej wydajności [7].

Przewidywania na 2021 rok [8] nadal obejmują technologie modelowania zachowań ludzi i systemów – patrz Rysunek 4.



Rysunek 4. Klasyfikacja najważniejszych strategicznych technologii w 2019 [7] oraz w 2021 roku [8]

Trudno nie zgodzić się ze Stephenem Fergusonem z Siemens, że przypadek Apollo 13 jest idealnym przykładem działania zgodnie z ideą Digital Twin. W uzasadnieniu Stephen Ferguson pisze [15] na temat cech wyróżniających Digital Twin w ujęciu misji Apollo 13 – patrz tabela poniżej.

CECHY WYRÓŻNIAJĄCE DIGITAL TWIN W UJĘCIU MISJI APOLLO 13 [15]

Fizyczne / Physical: Digital Twins są najbardziej użyteczne, gdy są powiązane z obiektem fizycznym, który (przynajmniej częściowo) jest poza zasięgiem człowieka.

Połączone / Connected: Digital Twins wymagają stałego sprzężenia zwrotnego w postaci danych z obiektu fizycznego. Dane te służą ciągłej aktualizacji parametrów modelu oraz są wykorzystywane do podejmowania decyzji inżynierskich. Nowoczesne DT używają do połączenia rozwiązań typu IoT (*Internet of Things*). W przypadku misji Apollo 13 NASA uzyskało ten sam cel przy pomocy zaawansowanej, dwukierunkowej transmisji danych.

Adaptowalne / Adaptable: Digital Twins powinny być rozwiązaniami wystarczająco elastycznymi, aby móc sprawnie reagować na zmiany w modelowanym obiekcie fizycznym. NASA miało możliwość szybkiej (w ciągu kilku godzin) rekonfiguracji symulatorów do konfiguracji, która nigdy nie była przewidywana podczas projektowania, i zastosowania uzyskanych dzięki temu nowych symulacji. Pozwoliło to dostarczyć kluczowe informacje do zespołu podejmującego decyzje i planującego sekwencje działań w celu sprowadzenia astronautów na ziemię.

Powiązane / Threaded: Nie było „jednego Digital Twin” dla misji Apollo 13. NASA użyło 15 różnych symulatorów, aby opanować różne aspekty misji. Także w przypadku dzisiejszych Digital Twins koncepcja, że powinien istnieć jeden zuniifikowany model, który umożliwi predykcję każdego aspektu obiektu rzeczywistego, jest błędna. Współczesne Digital Twins składają się z wielu oddziałujących na siebie, współdziałających modeli, które mogą być tak zestawiane, aby możliwe było uwzględnienie różnych aspektów modelowanego obiektu fizycznego.

Responsywne / Responsive: Wydarzenia misji Apollo 13 trwały trzy i pół dnia, podczas których wykonano niesamowitą liczbę adaptacji i zmian inżynierskich. Jest do dzisiaj mało prawdopodobne, żeby zmiany w Digital Twins mogły być wdrażane tak szybko w przypadku awarii obiektu fizycznego.

Konstrukcja Digital Twin

Można wyróżnić dwa główne kierunki/technologie budowy DT:

- Modele oparte o analitykę strumieni danych, algorytmy uczenia maszynowego i rozwiązania płynące z zastosowania sztucznej inteligencji** – mające na celu poszukiwanie wzorców prawidłowości i nieprawidłowości w strumieniach danych pochodzących z obiektu rzeczywistego, uczące się wzorców „zachowań” obiektu rzeczywistego ocenionych jako poprawne i niepoprawne w procesie uczenia maszynowego i doskonalące algorytmy oceny stanów innych od wzorcowych dzięki możliwościom sztucznej inteligencji.
- Modele „fizyczne” oparte o własności i parametry fizyczne obiektu rzeczywistego**, takie jak dane geometryczne, materiałowe, technologiczne – zarówno bazujące na zależnościach/wzorach matematycznych, jak i cyfrowych modelach typu: FEM (*finite element method*), FDM (*finite-difference method*) czy CFD (*Computational Fluid Dynamics*) itp., pracujące pod kontrolą ludzi i/lub algorytmów wykonujących iteracyjne obliczenia modelujące stany obiektu fizycznego.

W zależności od przewidywanego zastosowania i oczekiwanych efektów stosuje się jedną lub obie metody, pracujące jako różne składniki cyfrowego bliźniaka obiektu. Poszukuje się optimum konstrukcji, dające zarówno szybkość rozwiązań AI, jak i precyzję oraz przewidywalność modeli fizycznych.

Przeznaczenie Digital Twins – do czego służą?

Digital Twin może składać się z wielu zagnieżdżonych bliźniaków, które zapewniają węższy lub szerszy wgląd w wyposażenie i zasoby na podstawie procesu lub przypadku użycia [14]. Na przykład obiekt taki jak rafineria ropy naftowej może mieć DT dla silnika sprężarki, całej sprężarki, ciągu technologicznego obsługiwanej przez tę sprężarkę oraz dla całej instalacji. W zależności od wielkości rafineria może mieć od 50 000 do 500 000 czujników wykonujących pomiary reprezentowane w DT.

WYRÓŻNIONO TRZY TYPY DIGITAL TWINS [14]

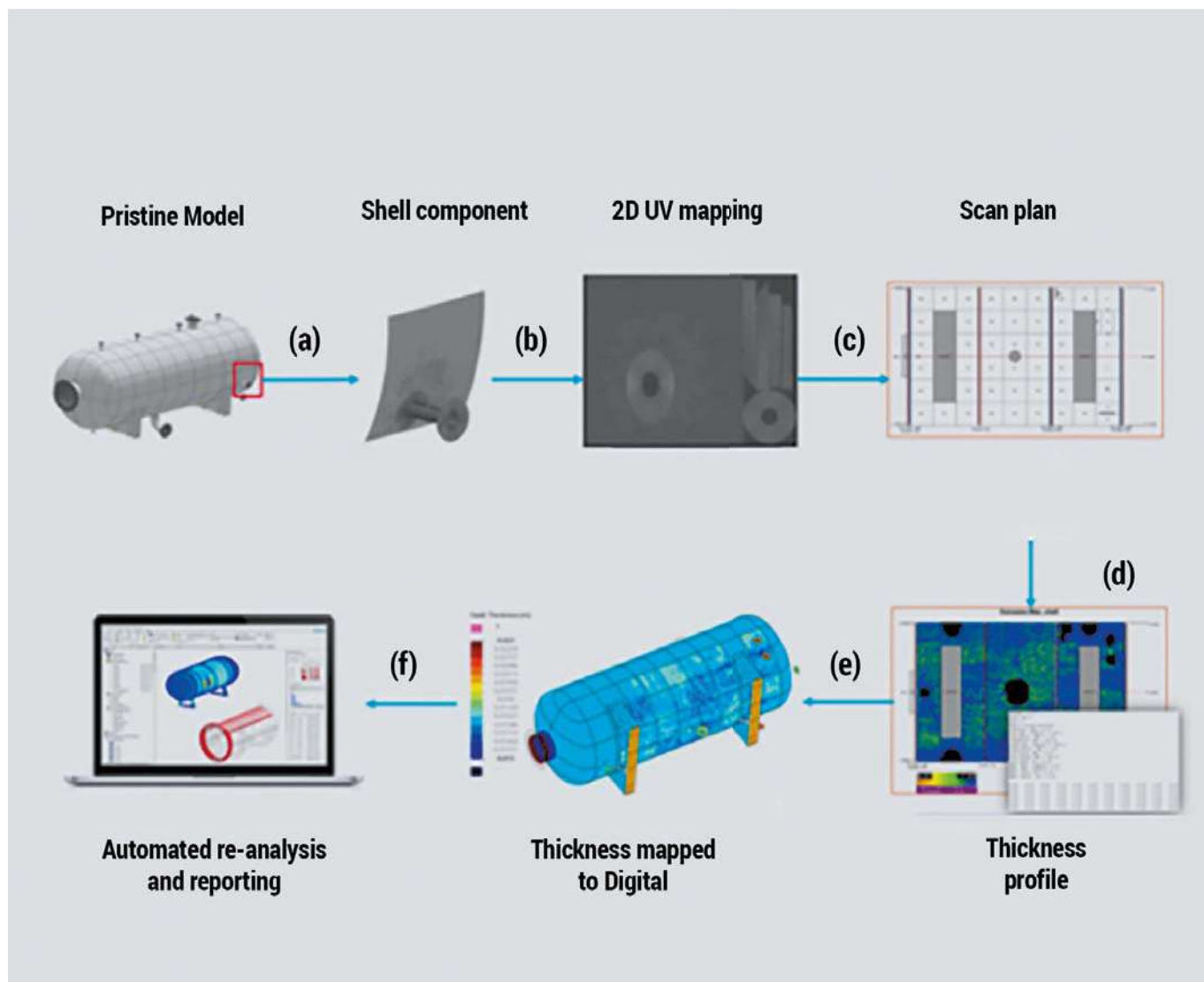
- Status Twins** pochodzą z wcześniejszych etapów projektowania produktu. Dane z systemów zarządzania cyklem życia produktu (PLM) to główne dane wejściowe, a przypadki ich zastosowania obejmują zazwyczaj zarządzanie urządzeniami, kontrolę produktu i jakość produktu.
- Operational Twins** umożliwiają organizacjom przemysłowym usprawnienie działania ich złożonych instalacji oraz urządzeń i są wykorzystywane do wspomaganie pracy inżynierów (proces, niezawodność itp.) oraz naukowców, którzy zajmują się danymi, wykonują analizy i operacje cyklu życia. Operational Twins mogą dziedziczyć dane ze Status Twins. Mogą również wykorzystywać metody uczenia maszynowego.
- Simulation Twins** odtwarzają zachowanie urządzenia i zawierają wbudowane modele fizyczne, a nawet modele procesów podłączonych do modelowanego wyposażenia. Przypadki użycia Simulation Twins obejmują symulacje działania sprzętu w różnych warunkach, szkolenia i rzeczywistość wirtualną (VR).

Grieves i Vickers w 2017 roku [20] sformułowali dwa przeznaczenia DT:

- Predykcyjne / Predictive** – Digital Twin będzie umożliwiał przewidywanie zachowania obiektu rzeczywistego.
- Badawcze / Interrogative** – cyfrowe kopie obiektu rzeczywistego będą umożliwiały wgląd w stan aktualny oraz historię zachowań obiektu rzeczywistego.

Również w 2017 roku w pracy [17] Elisy Negri i zespołu – na podstawie przeglądu dostępnej wówczas literatury – wskazano trzy główne kierunki zastosowania Digital Twin:

- Wsparcie analiz stanu technicznego / kondycji obiektu rzeczywistego w celu usprawnienia planowania i czynności konserwacyjnych.
- Cyfrowe odzwierciedlenie życia obiektu fizycznego, aby zbadać jego długoterminowe zachowanie, przewidzieć jego działanie, zapewnić ciągłość informacji na różnych etapach cyklu życia, prowadzić tzw. Virtual Commissioning lub zarządzać cyklem życia urządzeń IoT.
- Wspomaganie w podejmowaniu decyzji poprzez wykonywanie analiz inżynierskich i statystycznych w celu optymalizacji zachowania systemu na etapie projektowania, przewidywania i ulepszania przyszłych osiągnięć czy parametrów produktu.



Rysunek 5. Zautomatyzowane workflows firmy Akseos wspierające przetwarzanie danych z inspekcji zbiornika ciśnieniowego (Źródło: <https://www.thechemicalengineer.com/features/under-pressure-digital-twins/>) [19]

Rysunek 5 przedstawia Digital Twin firmy Akseos bazującego na „fizycznym” modelu zbiornika ciśnieniowego i zawierającego cyfrową replikę obiektu fizycznego utworzoną w środowiskach służących do modelowania mechaniki konstrukcji oraz do obliczeń FEM (MES) i aktualizowaną danymi z okresowych pomiarów grubości ścianki obiektu rzeczywistego [19]. To zautomatyzowane narzędzie umożliwia bardzo szybkie wykonanie analizy wytrzymałości konstrukcji oraz predykcji czasu i parametrów zdadności do eksploatacji obiektu rzeczywistego – niemal natychmiast po zaktualizowaniu danych pomiarowych.

Dane Digital Twin – nieodłączny element, ale i wartość dodana

Modelowanie DT jest procesem iteracyjnym. Model powinien charakteryzować się wysoką standaryzacją, modularyzacją, lekkością i solidnością [5]. Owe wirtualne modele, aby być cyfrowymi bliźniakami i jak najlepiej odzwierciedlać obiekty rzeczywiste, muszą zależeć od danych ze świata rzeczywistego i odtwarzać, w miarę możliwości w czasie rzeczywistym, parametry, warunki brzegowe oraz dynamikę danej obiektu [5]. Cyfrowy bliźniak będzie dobrze pełnił swoje zadania tylko wtedy, gdy zostanie utworzony przy pełnym zrozumieniu obiektu rzeczywistego i płynących z niego danych. W przeciwnym wypadku

model wirtualny nie mógłby efektywnie współpracować z obiektem rzeczywistym, a wnioskowanie byłoby obarczone nieakceptowalnymi błędami. Model powstaje oraz działa głównie dzięki danym. Należy pamiętać, że od stanu surowego do wiedzy i zrozumienia działania obiektu rzeczywistego dane muszą przejść etapy obróbki w tzw. data lifecycle [5], czyli:

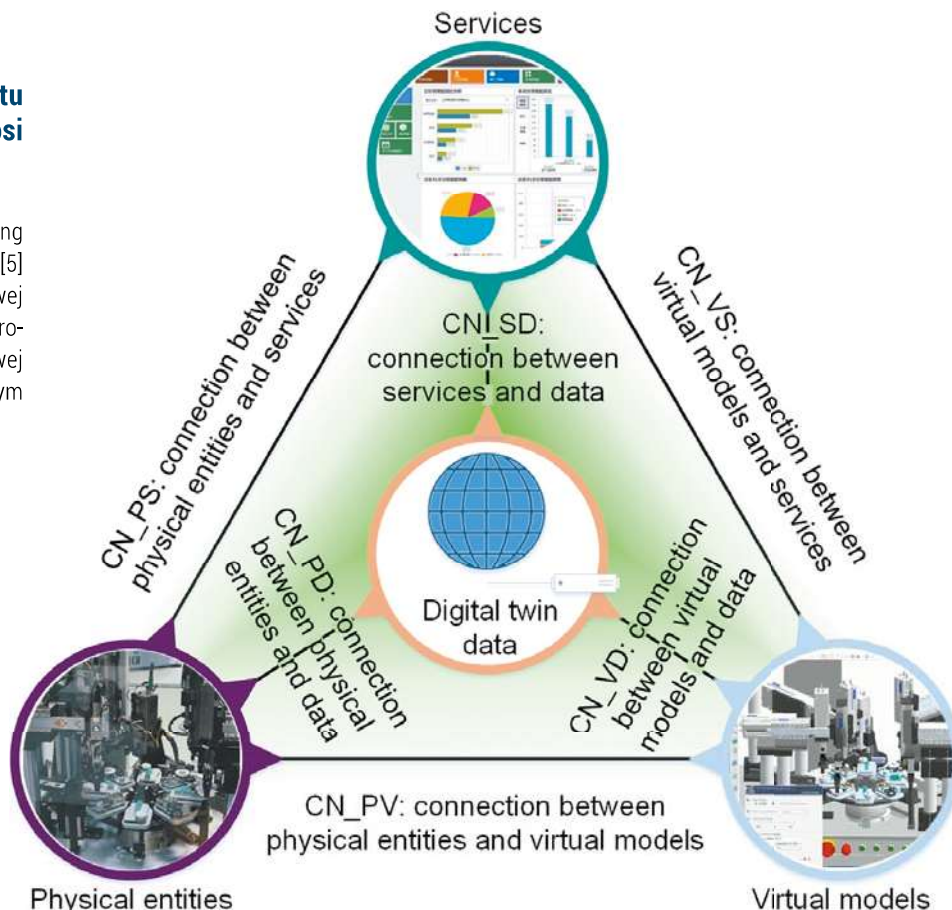
Data collection → Data transmission → Data storage → Data processing → Data fusion → Data visualization

Jednym z większych wyzwań na drodze do utworzenia Digital Twin są dane z czujników, które są przeważnie zamknięte w systemach danych historycznych i przechowywane w formacie zazwyczaj płaskim – bez kontekstu, czyli np. bez informacji o zmianach w procesie lub zakłóceniach. Prowadzi to do tego, że analityka na podstawie tych danych jest prawie niemożliwa [14]. Dane muszą zawierać stan relacji ze związanym z nimi zasobem. Dane cyfrowego bliźniaka to zarówno dane z obiektu rzeczywistego, jak i dane z modeli cyfrowych. Informacje przesyłane pomiędzy obiektem rzeczywistym a wirtualnym oraz usługami skojarzonymi z tymi obiektami stają się dodatkowymi „wymiarami”, z których czerpane są wnioski służące do realizacji celu istnienia DT.

Dopiero fuzja danych z obiektu rzeczywistego i wirtualnego wnosi najwyższą wartość dodaną

Aby to podkreślić, w publikacji „Enabling technologies and tools for Digital Twin” [5] zaproponowano rozszerzenie 3-wymiarowej koncepcji Digital Twin (Rysunek 1), wprowadzonej przez Grievesa, do 5-wymiarowej (Rysunek 6) – wyróżniając w pierwotnym ujęciu „danych”:

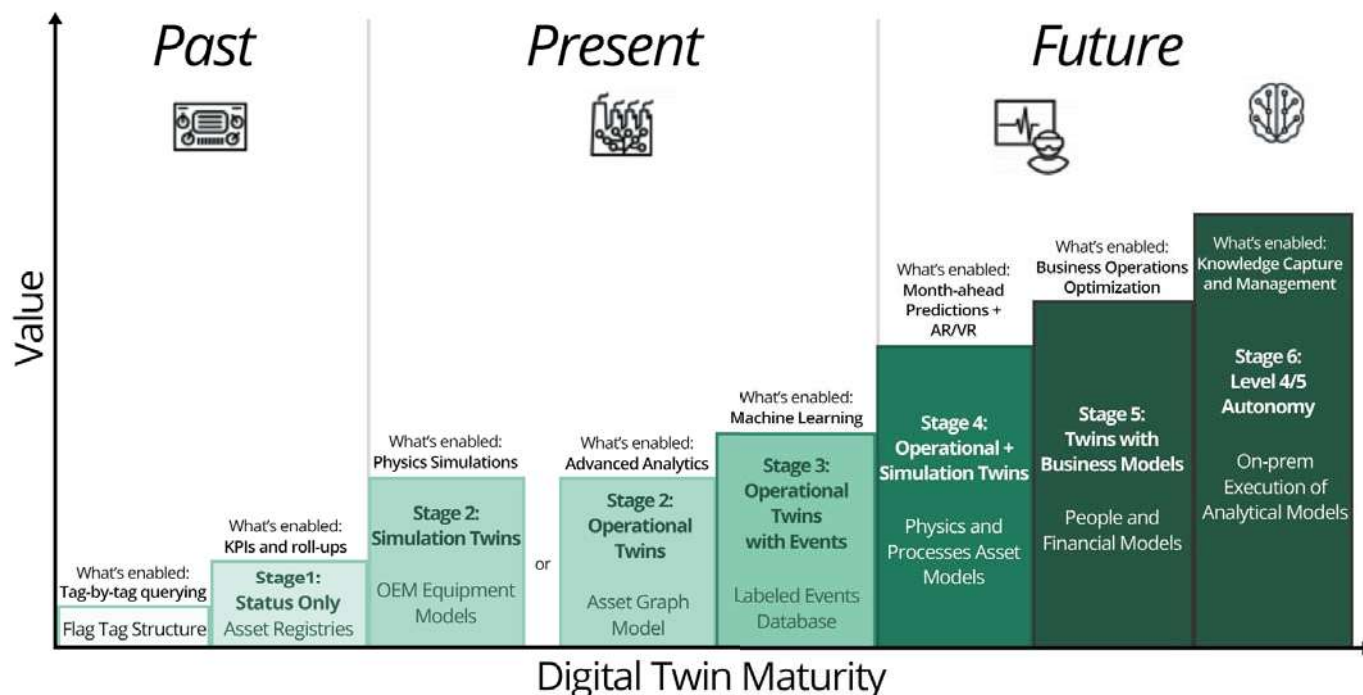
- Ss – usługi,
- DD – dane Digital Twin,
- CN – połączenia.



Rysunek 6. 5-wymiarowa koncepcja Digital Twin zaproponowana przez Qinglin Qi et al. w Journal of Manufacturing Systems [5]

Stopień zaawansowania Digital Twin

Według autorów Digital Twins for the asset operator [14] zaawansowanie Digital Twin obejmuje osiem stopni (Rysunek 7)



Rysunek 7. Klasyfikacja dojrzałości cyfrowych bliźniaków wg Andy Bane, Sameer Kalwani, Sean McCormick „Digital Twins for the asset operator” [14]

Wielu operatorów przemysłowych ma wdrożone Status Twins, które zapewniają możliwość wyświetlania bieżących odczytów z sensorów umieszczonych na urządzeniach. Wiele podmiotów sektora przemysłowego zaczęło już podążać ścieżką analityczną rozpoczynającą się od Simulation Twins. Nawet producenci wyposażenia (OEM) zaczęli sprzedawać takie „fizyczne” modele jako usługi (np. pompy w przemyśle nafto-

wym, wiatraki itp.). W większości przypadków takie Simulation Twins funkcjonują sprawnie, dopóki nie zostaną powiązane z wyposażeniem zewnętrznym. W przypadku bardziej złożonych procesów, czyli w większości procesów przemysłowych, dobre Simulation Twins mogą być trudne do utworzenia oraz utrzymania [14]. Niemniej zastosowanie Operational DT oraz Simulation DT może istotnie ułatwić inżynierom operacyjnym usprawnianie procesu [14].

Następnym szczeblem rozwoju – o najwyższej wartości dodanej – jest interaktywne połączenie tych narzędzi z ryzykiem, rachunkami zysków i strat oraz bilansem przedsiębiorstwa. Wówczas jednak, aby poprawić rentowność procesów i zmniejszyć związane z nimi ryzyko, niezbędne jest utrzymywanie relacji między cyfrowymi bliźniakami a modelami finansowymi, ludźmi, a nawet informacjami o zagrożeniach procesowych [14], czyli np. zintegrowanie DT z systemami PSM (*Process Safety Management*).

Jakie nadzieje i perspektywy wiążemy z technologią Digital Twin i technologiami Przemysłu 4.0?

Technologia Digital Twin znalazła już swoje zastosowanie wśród takich firm jak GE, PTC, Siemens, ANSYS, Dassault [5].

Microsoft [10] wskazuje na potencjał tej technologii w:

- personalizacji usług pod wymagania klientów,
- przyspieszeniu projektowania poprzez możliwość wirtualnego eksperymentowania z kolejnymi iteracjami projektowanego produktu,
- zapobieganiu przestojom dzięki przewidywaniu uszkodzeń i predictive maintenance,
- zrewolucjonizowaniu mechanizmów wymiany wiedzy pomiędzy pracownikami.

Grupa DNV GL [11] opisuje swoje osiągnięcia uzyskane dzięki zastosowaniu „wirtualnego siostrzanego statku” przy zwiększeniu niezawodności, ograniczaniu kosztów operacyjnych i poprawie bezpieczeństwa statków.

Tesla ma na celu stworzenie cyfrowego bliźniaka każdego samochodu swojej produkcji, m.in. poprzez uruchomienie synchronicznej transmisji danych pomiędzy pojazdem z fabryką [12].

General Electric Company (GE) – wykorzystując platformę Predix – stworzył nową generację produktów i usług dotyczących farm wiatrowych, która pozwala operatorom na optymalizację strategii konserwacji, poprawy niezawodności i dostępności oraz zwiększenie produkcji energii [13].

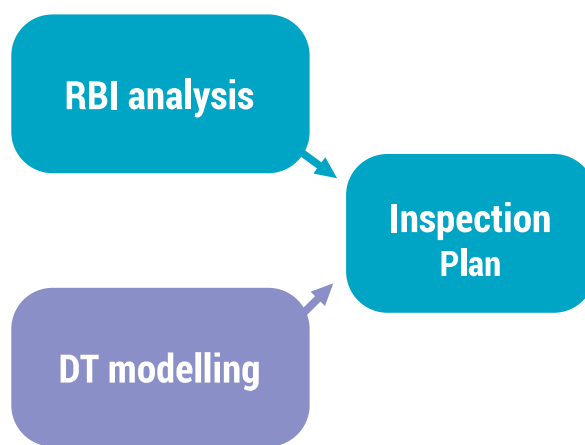
Technologia Digital Twin jest już z powodzeniem wykorzystywana w modelowaniu zużycia obiektów o ograniczonej liczbie „stopni swobody”, np. maszynach wirujących. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej oraz rozwojem technologii i narzędzi modelowania i nadzorowania złożonych procesów rośnie prawdopodobieństwo jej wdrożenia w przemyśle – począwszy od najbardziej kluczowych urządzeń i węzłów technologicznych lub miejsc, gdzie dokładniejsza ocena ryzyka zaprocentuje wysoką stopą zwrotu z ograniczonego postępu i zużycia urządzeń oraz wydłużenia eksploatacji i poprawy jej efektywności.

W odniesieniu do przedmiotu działalności UDT – możliwości stwarzane przez nowoczesne technologie uwalniają szereg dotąd trudno dostępnych rozwiązań, w szczególności w zastosowaniu do urządzeń, które nie są łatwo dostępne do badań technicznych.

Badania konieczne do ustalenia aktualnego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń często wymagają kosztownych wyłączeń z eksploatacji lub, z uwagi na występujące w nich mechanizmy degradacji eksploatacyjnej, samo badanie wymaga odpowiednich przygotowań i znacznych nakładów lub ingerencji w konstrukcję urządzenia, np. w pobranie próbek z materiału konstrukcyjnego celem ich laboratoryjnego zbadania. Również samo badanie może zainicjować degradację wskutek wprowadzenia powietrza lub wilgoci do wnętrza urządzenia.

Aktualnie posługujemy się metodologią RBI [16], wspierając się doświadczeniem i dostępną wiedzą na temat zjawisk korozyjnych w przemyśle oraz sposobów oceny uszkodzeń, tj. *Fitness-for-Service*.

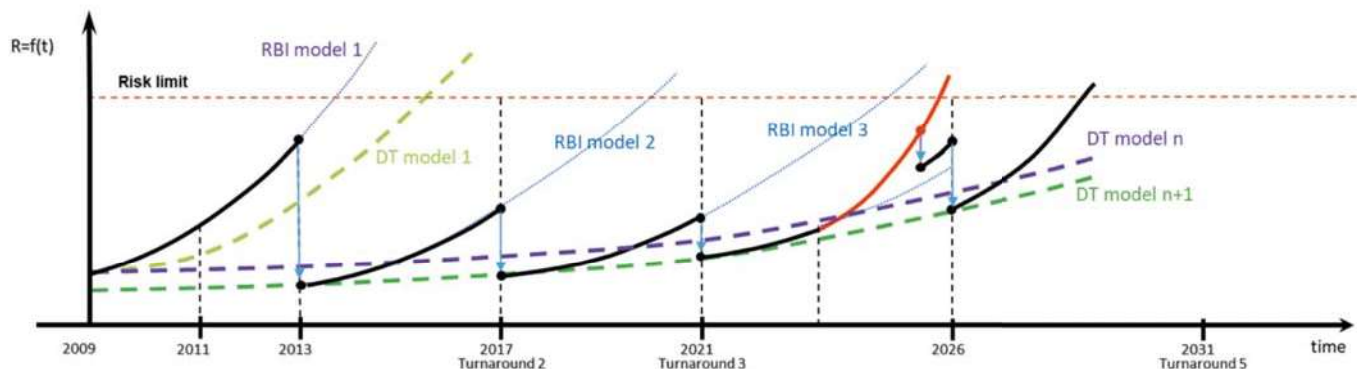
Ostatnie 10 lat stosowania RBI wykazały realne obniżenie kosztów po stronie przedsiębiorców, wynikających z konieczności wykonywania inspekcji, zapewniając utrzymanie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji. Badając możliwości zastosowania Digital Twin, planujemy uzyskanie uzupełnienia i logicznego rozwinięcia RBI – szczególnie w procesach o dużej zmienności parametrów i przy ograniczonych możliwościach prowadzenia częstej weryfikacji stanu technicznego poprzez badania techniczne (Rysunek 8).



Rysunek 8. Modelowanie DT jako uzupełnienie modelowania bazującego na API RP 581 Risk-Based Inspection Methodology [16] (opr. UDT)

Modelowanie Digital Twin może pozwolić na bardziej precyzyjną optymalizację terminów i zakresów wykonania badań czy pobierania próbek (Rysunek 9).

Aby prowadzić skuteczną predykcję poszczególnych zjawisk fizycznych i chemicznych, w tym m.in. zjawisk wywołujących mechanizmy degradacji, musimy operować dynamiczną przestrzenią stanów instalacji i posługiwać się odpowiednimi metodami na opisujących ją zbiorach danych. Celem jest zrozumienie procesu przez ludzi i nadążanie za nim przez model. Wymaga to stale aktualizujących się modeli (Rysunek 9), ogromnych baz danych i potężnej mocy obliczeniowej. Potrzebne są także skuteczne metody nadzoru nad integralnością i wiarygodnością modeli.



Rysunek 9. Modelowanie wzrostu ryzyka eksploatacji urządzeń wg metodologii RBI oraz Digital Twins (opr. UDT)

Wdrożenie Digital Twin jest uzasadnione wszędzie tam, gdzie występuje dodatni bilans wdrożenia. W niedługiej perspektywie wraz ze wzrostem doświadczenia, popularyzacją i obniżaniem się cen tej technologii oraz jej standaryzacją opracowywaną m.in. przez IEC (International Electrotechnical Commission) coraz większe grupy urządzeń czy procesów będą mogły zostać objęte tą technologią. Jak powiedział Thomas Kaiser, jeden z prezesów SAP w IoT [6]:

„Cyfrowe bliźniaki stają się imperatywem biznesowym, obejmującym cały cykl życia zasobu lub procesu i tworzącym podstawę dla powiązanych produktów i usług. Firmy, które nie zareagują, zostaną w tyle”.

Poprzez analizę i ocenę bieżących stanów modelowanego obiektu, analizę historii problemów i działania oraz predykcję trendów na przyszłość Digital Twin może dostarczyć bardziej wszechstronnego wsparcia w podejmowaniu decyzji w ogromnym zakresie działań.

Po zintegrowaniu z cyfrowymi reprezentacjami obiektów, środowisk i ludzi Digital Twin może zostać zastosowany np. do celów prototypowania produktów oraz szkolenia obsługi, personelu utrzymania ruchu, dostawców usług itp. [9]. Może też zrewolucjonizować mechanizmy wymiany wiedzy między pracownikami w poszczególnych organizacjach [10].

Poprzez narzędzia symulacyjne oraz narzędzia rozszerzonej lub wirtualnej rzeczywistości Digital Twin może pomóc pogłębić zrozumienie skomplikowanych fizycznych procesów i obiektów [5].

Innowacyjne podejście do bezpieczeństwa urządzeń technicznych od zawsze było wbudowane w DNA Urzędu Dozoru Technicznego. Odkąd powstał, poszukujemy coraz skuteczniejszych metod zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji. Od wielu lat wdrażamy i promujemy nowe technologie w inspekcji.

Technologie przemysłu 4.0 są coraz bardziej dostępne i z uwzględnieniem ewolucyjnych zmian systemów zarządzania produkcją oraz z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa teleinformatycznego są implementowane w wielu gałęziach przemysłu. Stwarza to wiele możliwości, które UDT dostrzega i spieszy wykorzystać w praktyce inspekcyjnej.

Wspieramy rozwój, dbamy o bezpieczeństwo. ■

Literatura:

- [1] Grieves M., Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (PDF). [on-line] <https://www.3ds.com>; dostęp: 07.02.2021.
- [2] Wikipedia, the free encyclopedia "Digital Twin". [on-line] en.wikipedia.org/wiki/Digital_Twin; dostęp: 31.01.2021.
- [3] Piasek, R. et al., Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map, 2010, NASA Office of Chief Technologist. [on-line] https://www.nasa.gov/sites/default/files/501625main_TA12-ID_rev6_NRC-wTASR.pdf; dostęp: 07.02.2021.
- [4] Shafto M. et al., DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap, Technology Area 11, 2010. [on-line] https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf; dostęp: 21.02.2021.
- [5] Qinglin Qi et al., Enabling technologies and tools for Digital Twin, Journal of Manufacturing Systems, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>; dostęp: 29.10.2020.
- [6] Marr B., What Is Digital Twin Technology – And Why Is It So Important?, Enterprise Tech, [on-line] Forbes; dostęp: 09.02.2021.
- [7] Panetta K., Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 – Smarter With Gartner, October 15, 2018; dostęp: 14.02.2021.
- [8] Panetta K., Gartner Top Strategic Technology Trends for 2021; October 19, 2020; dostęp: 14.02.2021.
- [9] Goossens P., Industry 4.0 and the power of the Digital Twin, Maple Soft. [on-line] <https://www.maplesoft.com/contact/webforms/PDF/2016/Industry4.0.pdf>; dostęp: 14.02.2021.
- [10] Microsoft Services, The promise of a Digital Twin strategy. [on-line] <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Microsoft%27s%20Digital%20Twin%20%27How-To%27%20Whitepaper.pdf>; dostęp: 14.02.2021.
- [11] DNVGL, Digital Twin at Work Available. [on-line] <https://www.dnvgl.com/feature/digital-twins.html>; dostęp: 14.02.2021.
- [12] Schleich B. et al., Shaping the Digital Twin for design and production engineering. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier, 2017, 66 (1), ff10.1016/j.cirp.2017.04.040ff. fhal-01513846. [on-line] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01513846/document>; dostęp: 14.02.2021.
- [13] GE Renewable Energy, Digital Wind Farm-The Next Evolution of Wind Energy. [on-line] <https://www.ge.com/renewableenergy/sites/default/files/2020-01/digital-wind-farm-solutions-gea31821b-r2.pdf>; dostęp: 14.02.2021.
- [14] Bane A., Kalwani S., McCormick S., Digital Twins for the asset operator, Element Analytics, Smart Industry; Oct 12, 2017; <https://www.smartindustry.com/articles/2017/digital-twins-for-the-asset-operator/>; dostęp: 09.02.2021.
- [15] Ferguson S., Apollo 13: The First Digital Twin. [on-line] <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>; dostęp: 14.02.2021.
- [16] API RP 581 Risk-Based Inspection Methodology, 2008 -> 2016.
- [17] Negri E., Fumagalli L., Macchi M., A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, Procedia Manufacturing, Volume 11, 2017, s. 939-948, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>. [on-line] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304067>; dostęp: 20.02.2021.
- [18] Lee J. et al., Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment, Manuf. Lett. 1 (2013), s. 38-41. [on-line] https://www.researchgate.net/publication/241174533_Application_of_data_mining_and_feature_extraction_on_intelligent_fault_diagnosis_by_Artificial_Neural_Network_and_k-nearest_neighbor; dostęp: 21.02.2021.
- [19] Young A., Under Pressure: Digital Twins. How structural Digital Twins can transform the maintenance and inspection of pressure vessels, Akseles, The Chemical Engineer, Industry 4.0, 7th February 2020. [on-line] <https://www.thechemicalengineer.com/features/under-pressure-digital-twins/>; dostęp: 21.02.2021.
- [20] Grieves M., Vickers J., Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, Kahlen FJ, Flumerfelt S., Alves A., editors. Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, 2017, s. 85-113.